

# Vida útil de concretos brancos quando inseridos em ambiente com cloretos: a influência do cimento e do coeficiente de difusão

*Service Life of White Concretes Exposed to Chlorides: the Influence of the Cement and the Diffusion Coefficient*

Ana Carina Rizzon  
Jairo José de Oliveira Andrade

## Resumo

A corrosão de armaduras devido à ação dos íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) é um dos principais problemas que ocorrem nas estruturas de concreto armado, diminuindo a durabilidade dessas estruturas. A durabilidade pode ser expressa numericamente pela vida útil, e as soluções da 2ª Lei de Fick são bastante utilizadas para esse propósito. Neste trabalho realizou-se um estudo da aplicabilidade da solução da função de erro em concretos moldados com um CP B e um CP IV. Foram produzidos concretos a partir de três relações a/c (0,4; 0,5; 0,6), submetidos aos ensaios de resistência à compressão e de penetração de cloretos, com duração de 6 meses. Os concretos de CP B apresentaram maiores valores de resistência à compressão que os concretos de CP IV, mas também maiores valores de coeficiente de difusão ( $D$ ). Verificou-se a diminuição de  $D$  ao longo do período estudado para os dois tipos de cimento, o que resultou no aumento da vida útil de projeto dos concretos analisados. Como tal variação não é contemplada pela solução da função de erro, esta não representa adequadamente as transformações que ocorrem em uma estrutura com o decorrer do tempo, e a vida útil estimada não corresponde àquela que a estrutura virá a ter.

**Palavras-Chave:** Vida útil. Cimento Portland branco. Cloretos. Coeficiente de difusão.

## Abstract

The corrosion of reinforcement due the action of chloride ions ( $\text{Cl}^-$ ) is one of the most common damages in reinforced concrete structures, decreasing the durability of those structures. The durability may be numerically expressed by the service life and the solutions from the second Fick's Law are normally used to obtain service life values. This paper presents the results of a study on the applicability of the error function solution using two cement types: CP B and CP IV. Concretes were produced with three w/c ratios (0,4; 0,5; 0,6), and submitted to compressive strength and the chloride ingress tests over a period of 6 months. The results showed that the compressive strength and the diffusion coefficient ( $D$ ) were higher for CP B than for CP IV. The value of  $D$  decreased along the test period for both types of cement, resulting in an increase of the estimated concrete service life. As the error function solution does not consider the variation of the parameter  $D$ , it does not adequately represent the transformations that happen in concrete structures over time, and the estimated service life does not correspond to the real one.

**Keywords:** Service life. White cement. Chlorides. Diffusion coefficient.

Ana Carina Rizzon  
Universidade Luterana do Brasil  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil  
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º  
andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Tel.: (51) 3308-3321  
E-mail:  
anacarina@rizzon.com.br

Jairo José de Oliveira  
Andrade  
Departamento de Engenharia  
Civil  
Pontifícia Universidade Católica  
do Rio Grande do Sul  
Av. Ipiranga, 6681, Prédio 30,  
Sala 280  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90619-900  
Tel.: (51) 3320-3625  
E-mail: jairo.andrade@puccrs.br

Recebido em 02/01/07  
Aceito em 06/12/07

# Introdução

## Vida Útil

A NBR-6118 (ABNT, 2003) apresenta o conceito de vida útil de projeto como sendo “o período de tempo em que se mantêm as características das estruturas de concreto”. Subentende-se pelas características atribuídas à estrutura aquelas imprescindíveis para que a mesma continue operando em condições plenas, quer de funcionalidade ou estética, permitindo segurança aos usuários, sem requerer custos inesperados para a sua manutenção.

De acordo com Helene (1993), há quatro tipos de vida útil. O primeiro tipo, objeto de estudo deste trabalho, corresponde à vida útil de projeto de uma estrutura, considerando o processo corrosivo. A vida útil de projeto representa o período que os cloretos despendem até atingirem a armadura.

Conforme verificado na literatura (ANDRADE, 1997; ARANHA, 1994; DAL MOLIN, 1988; STEWART; ROSOWSKY, 1998), a corrosão das armaduras tem se apresentado como a manifestação patológica de maior incidência em estruturas de concreto, cujos principais agentes que iniciam o processo são os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e a carbonatação ( $\text{CO}_2$ ). Os íons cloreto agem sobre a película passivadora da armadura, enquanto a carbonatação reduz a estabilidade dessa película mediante a diminuição da alcalinidade do concreto (KULAKOWSKI, 2002).

Os íons cloreto podem ser introduzidos no concreto ainda na sua produção, pelo uso de materiais contaminados ou pelo uso de aditivos aceleradores de pega, o que não é mais tão freqüente, pois, conhecidos os efeitos nocivos dos cloretos às estruturas, os aditivos atualmente possuem uma composição química bastante controlada. Entretanto, geralmente os cloretos responsáveis pela deterioração da armadura encontram-se disponíveis no ambiente em que a estrutura está exposta (KROPP, 1995), e isso reflete a situação de muitas capitais brasileiras localizadas em área salina, como Rio de Janeiro, Recife, Salvador, Natal, Florianópolis, João Pessoa, Vitória e Aracaju. Com a incidência da névoa salina nas estruturas, depositam-se grandes quantidades de cloretos sobre a superfície do concreto, que em seguida penetram para o interior do material.

Em decorrência disso, cresce a preocupação com a questão de durabilidade e vida útil das estruturas. Com a mesma preocupação alguns pesquisadores desenvolveram modelos para prever a vida útil de projeto de estruturas, fornecendo assim subsídios

para a execução de obras com melhores características e maior durabilidade. Tais modelos, que em geral se originam da 2ª Lei de Fick, estão apresentados na literatura (ANDRADE, 2001; CALÇADA, 2004; LORENSINI; DINIZ, 2006; RIZZON, 2006). Neste trabalho, é abordada a aplicabilidade da solução da função de erro da 2ª Lei de Fick.

Como já citado por Andrade (2001), a 2ª Lei de Fick é bastante utilizada para a modelagem da penetração de cloretos através do concreto. Porém, algumas de suas soluções não consideram a variação de parâmetros fundamentais relacionados à ação do meio ambiente e as modificações que ocorrem na microestrutura do concreto ao longo do tempo, tais como o coeficiente de difusão ( $D$ ) e a concentração superficial de cloretos ( $C_s$ ). A solução da função de erro não considera a variação de nenhum desses parâmetros, de forma que, para o seu emprego na previsão de vida útil, Andrade (2001) estabelece algumas condições:

- (a) admite-se que o concreto é um material homogêneo e isotrópico;
- (b) considera-se que o único mecanismo de transporte atuante é a difusão;
- (c) admite-se que não ocorrem interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração;
- (d) o meio considerado é infinito; e
- (e) tanto o coeficiente de difusão quanto a concentração superficial de cloretos são constantes ao longo do tempo, isto é, o coeficiente de difusão é completamente independente da concentração superficial.

Analisando as condições de contorno, constata-se que a solução da função de erro não representa com autenticidade a penetração de cloretos no concreto, já que alguns mecanismos de transporte podem atuar simultaneamente (NEPOMUCENO, 2005), além da variabilidade do coeficiente de difusão e da concentração superficial demonstrada experimentalmente (HALAMICKOVA *et al.*, 1995; SWAMY *et al.*, 1994).

A partir dessas considerações, observou-se a importância do estudo do comportamento das variáveis  $D$  e  $C_s$  no tempo, e da aplicabilidade da solução da função de erro para a previsão de vida útil, visto que tal solução não considera a variabilidade das variáveis  $D$  e  $C_s$ .

## Cimento Branco

Continuamente surgem no mercado da construção civil materiais novos e misturas diferentes, ampliando ainda mais as possibilidades de utilização do concreto. O cimento Portland branco apresenta-se como uma nova tendência. É regulamentado pela NBR 12989 (ABNT, 1993), que o classifica em dois subtipos, estrutural e não estrutural, sendo o não estrutural utilizado para rejuntamento de pastilhas, para revestimento e outros.

O cimento Portland branco estrutural vem sendo utilizado desde em estruturas de concreto armado até em elementos isolados, na forma de *pavers*, meios-fios, entre outros. A variedade de cores obtidas pela adição de corantes ao concreto branco e a compatibilidade das propriedades mecânicas com as estéticas do material contribuem para difundir ainda mais essa nova tendência (HELENE; GALANTE, 1999; PASSUELO, 2004).

O cimento branco se diferencia dos demais tipos de cimento por sua tonalidade mais clara, que é obtida pela utilização de matérias-primas e equipamentos especiais para produção de um clínquer com teor de ferro inferior ao do cimento cinza. A concentração de ferro no clínquer é um dos fatores que confere a diferença de tonalidade clara e escura ao cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A quantidade de clínquer no cimento branco é, em geral, reduzida devido à substituição por fíler

calcário em sua composição, o que contribui com a alvura do material, porém não contribui com as propriedades relacionadas à durabilidade. Diferentemente das pozolanas, o fíler não forma C-S-H secundário com o passar do tempo, exercendo apenas um efeito físico na microestrutura do concreto de preenchimento dos poros, e com uma redução de material cimentício pela substituição de clínquer por fíler no CP B (RIZZON, 2006).

Vistas a importância do estudo da durabilidade das estruturas descrito na seção “Vida Útil” e a utilização crescente desse novo material, observa-se a relevância da realização de estudos para a investigação de suas propriedades e da contribuição com a questão da vida útil de projeto.

## Materiais e Métodos

### Caracterização dos Materiais Utilizados

#### Cimentos

Para a confecção dos concretos dos corpos-de-prova e vigas foram empregados dois tipos de cimento Portland, um branco estrutural (CP B) e um pozolânico (CP IV), utilizado como referência. A composição química dos cimentos encontra-se na Tabela 1, e suas características físicas e mecânicas encontram-se na Tabela 2. Os valores apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2 foram fornecidos pelos fabricantes dos cimentos, que são de origem nacional.

Parâmetros	Unidade	CP B	CP IV
C <sub>3</sub> S	%	66,86	59,22
C <sub>2</sub> S	%	12,01	10,23
C <sub>4</sub> AF	%	0,55	8,47
C <sub>3</sub> A	%	11,81	6,08
SO <sub>3</sub>	%	1,84	2,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,57	11,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,18	4,73
CaO (Livre)	%	2,53	2,27
CaO	%	66,52	34,3
Perda ao Fogo – PF	%	3,59	1,82
Resíduo Insolúvel – RI	%	0,4	41,56

Tabela 1 - Propriedades químicas dos cimentos

Parâmetros		Unidade	CP B	CP IV
Área específica Blaine		cm <sup>2</sup> /g	3271	5080
Início de pega		h:min	02:34	07:10
Fim de pega		h:min	04:17	–
Massa específica		g/cm <sup>3</sup>	2,99	2,82
Resistência mecânica (MPa)	3 dias	MPa	23,76	18,60
	7 dias	MPa	29,48	21,70
	28 dias	MPa	40,40	34,30

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos

De acordo com a Tabela 1, entre os compostos químicos principais dos cimentos, o C<sub>4</sub>AF é o que apresenta uma diferença mais acentuada de um cimento para o outro, estando presente em uma quantidade limitada no CP B. Por consequência, há um aumento no teor de C<sub>3</sub>A nesse cimento, conforme já observado por Kirchheim *et al.* (2005).

Os teores de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF dos cimentos em estudo estão de acordo com aqueles apresentados na literatura, que apresenta uma variação de 4% a 13% para o C<sub>3</sub>A e valores < 1% para o C<sub>4</sub>AF no CP B, e de 5% a 10% e de 3% a 8%, respectivamente, nos cimentos cinzas comuns (LEA; TAYLOR; KIRCHHEIM *apud* KIRCHHEIM *et al.* 2005; NEVILLE, 1997).

#### Agregados

Os agregados foram cuidadosamente selecionados, de forma que estivessem isentos de impurezas e umidade, o que poderia interferir nas propriedades dos concretos produzidos.

Utilizou-se agregado graúdo de origem basáltica, classificado como brita 1, de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987), e como agregado miúdo empregou-se areia natural de origem quartzosa, com módulo de finura de 2,54. As características físicas dos agregados determinadas conforme as normas NBR 7217 (ABNT, 1987) e NBR 9776 (ABNT, 1986) encontram-se na Tabela 3.

#### Resina Epóxi

Para a impermeabilização das vigas do ensaio de penetração de cloretos utilizou-se um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade.

#### Cloreto de Sódio

Utilizou-se cloreto de sódio em forma de sal refinado na preparação da solução de imersão das vigas do ensaio de cloretos.

## Procedimentos Experimentais

### Método de Dosagem

Utilizou-se o método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993) para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto conforme especificações da NBR 5738 (ABNT, 1994a), cujos parâmetros foram a obtenção de um abatimento de 7,0 cm ± 1,0 cm e de um teor de argamassa de 50%. A partir dos diagramas de dosagem e dos valores pré-fixados de relação a/c (0,4; 0,5; 0,6) foram determinados os traços definitivos dos concretos, apresentados na Tabela 4, onde consta também o consumo de cimento conforme o traço de concreto e o tipo de cimento.

### Produção dos Concretos

A partir do proporcionamento apresentado na Tabela 4, realizou-se a mistura dos materiais em betoneira de eixo inclinado, com a ordem de colocação dos materiais seguindo o recomendado por Helene e Terzian (1993). O abatimento do concreto foi verificado através do ensaio de tronco de cone, conforme especificações da NBR 7223 (ABNT, 1982), mostrado na Figura 1a. Em seguida, realizou-se a moldagem dos corpos-de-prova e vigas. Foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) para a realização do ensaio de resistência à compressão simples e uma viga de dimensões 10 cm x 20 cm x 50 cm para o ensaio de penetração de cloretos para ambos os cimentos utilizados. Utilizou-se vibrador mecânico com agulha de 25 mm no adensamento dos corpos-de-prova e vigas, que foi executado em uma única camada. Como desmoldante, utilizou-se óleo mineral.

A cura se deu de forma distinta para os corpos-de-prova e vigas. Os primeiros foram imersos em água, na temperatura ambiente, onde permaneceram até as idades de realização dos ensaios. Para as vigas, realizou-se um

procedimento de cura similar ao de algumas obras de construção civil, onde os elementos são cobertos por panos, ou até mesmo serragem, sendo umedecidos por determinado período (Figura 1b). Dessa forma, as vigas foram cobertas com panos

umedecidos durante sete dias e, após a retirada dos panos, permaneceram expostas em ambiente de laboratório por mais 21 dias. Completos os 28 dias de idade, as vigas foram preparadas para o ensaio de penetração de cloretos.

Determinações	Método de ensaio	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Dimensão máxima característica	NBR 7217 (ABNT, 1987)	19 mm	4,8 mm
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 9776 (ABNT, 1986)	2,65	2,62
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 9776 (ABNT, 1986)	1,56	1,51

Tabela 3 - Características dos agregados utilizados na produção dos concretos

Tipo de cimento	Relação a/c	Traço em massa	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
CP IV	0,4	1 : 0,68 : 1,86	558
	0,5	1 : 1,54 : 2,54	415
	0,6	1 : 2,22 : 3,22	331
CP B*	0,5	1 : 1,78 : 2,78	389
	0,6	1 : 2,35 : 3,35	322

\* Ao final do trabalho verificou-se um problema relacionado à dosagem do concreto de CP B de relação a/c 0,4, portanto seus resultados não são apresentados.

Tabela 4 - Traços definitivos dos concretos de CP B e CP IV



Figura 1 - (a) Determinação do abatimento de concreto de CP B através do ensaio de tronco de cone e (b) Cura das vigas em ambiente de laboratório

## Ensaio de Resistência à Compressão

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias de idade, sendo retirados da cura em imersão um dia antes da realização do ensaio para capeamento. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 1994b).

## Ensaio de Penetração de Cloretos

Foi realizado um ensaio não acelerado de penetração de cloretos, com duração de seis meses, para que a penetração de cloretos ocorresse naturalmente, simulando uma situação real. A solução de cloretos foi produzida a partir da dissolução de cloreto de sódio (NaCl) a uma concentração de 3,5% em água, conforme a concentração média verificada nos oceanos (NEVILLE, 1997; HELENE, 1993). As vigas utilizadas na realização do ensaio foram previamente preparadas conforme esquematizado na Figura 2. Suas faces menores foram impermeabilizadas com resina epóxi, direcionando assim o fluxo de cloretos através das faces maiores (20 cm x 50 cm).

Para a determinação do teor de cloretos, foram retiradas amostras de concreto das vigas a cada dois meses de imersão sob a forma pulverulenta com uma furadeira de impacto, com furos a cada 5 mm de profundidade até 25 mm da superfície, o que permitiu o traçado do perfil de penetração de cloretos em função da profundidade.

Para a medida do teor de cloretos das amostras de concreto, realizou-se a titulometria, conforme o princípio apresentado pelo método de Mohr, que consiste em adicionar à solução de cloretos cromato de potássio ( $K_2CrO_4$ ) como indicador, e em seguida nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) como titulante, até atingir o ponto de viragem. O ponto de viragem equivale ao volume correspondente de nitrato que permite a mudança de coloração da mistura para um tom marrom-avermelhado, que é alcançado pela precipitação do cromato de prata ( $Ag_2CrO_4$ ).

## Emprego da Solução da Função de Erro da 2ª Lei de Fick

Utilizando os perfis de penetração de cloretos, e com o auxílio de um *software*, determinou-se o coeficiente de difusão ( $D$ ) e a concentração superficial ( $C_s$ ) de cloretos para cada traço de concreto confeccionado. Os dados foram ajustados

empregando-se o Método dos Mínimos Quadrados na solução da função de erro da 2ª Lei de Fick, expressa pela Equação 1.

$$C(x,t) = C_s \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \quad 1$$

onde:

$C(x,t)$  = concentração de cloretos na profundidade  $x$ , em um tempo  $t$ , em %;

$C_s$  = concentração de cloretos na superfície do concreto, admitida constante, em %;

$x$  = profundidade, em cm;

$D$  = coeficiente de difusão de cloretos, em  $cm^2/ano$ ;

$t$  = tempo, em anos; e

$\operatorname{erfc}$  = função complementar de erro de Gauss.

Na Equação 1 isolou-se a variável tempo, tornando-a dependente das demais variáveis, obtendo-se a Equação 2. Na Equação 2,  $t$  representa o tempo para despassivação das armaduras, que é a vida útil de projeto das estruturas de concreto (ANDRADE, 2005).

$$t = \frac{x^2}{4D} \left[ \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{C_s - C_x}{C_s} \right) \right]^2 \quad 2$$

Com a Equação 2, determinou-se a vida útil de projeto dos concretos moldados com CP B e CP IV de relação  $a/c$  0,5, utilizando como dados de entrada os valores de  $D$  e  $C_s$  dos 2, 4 e 6 meses em que os concretos estiveram imersos na solução de cloretos. Adotou-se como cobrimento de armadura 50 mm, o maior valor recomendado pela NBR-6118 (ABNT, 2003), para ambientes de agressividade muito forte. A quantidade crítica de cloretos foi fixada em 0,4% em relação à massa de cimento, como o valor-limite para despassivação.

## Resultados e Discussão

### Resistência à Compressão

Os valores médios de resistência à compressão dos corpos-de-prova rompidos aos 3, 7 e 28 dias de idade dos concretos estão expressos graficamente na Figura 3.

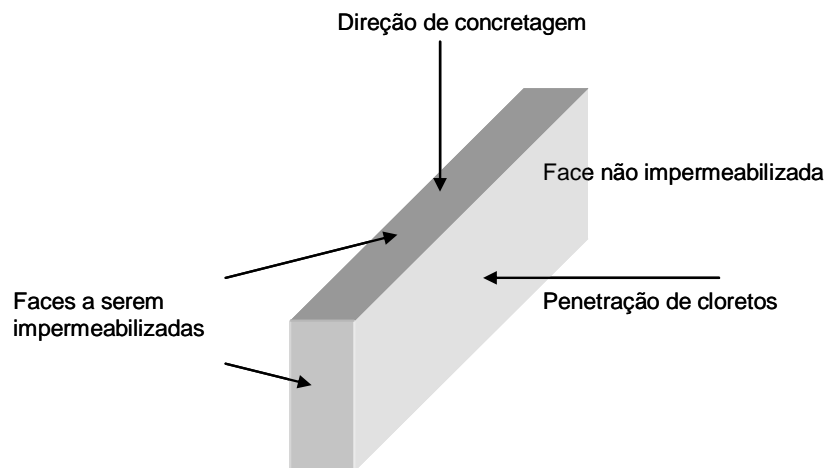


Figura 2 - Representação esquemática das vigas utilizadas no ensaio de cloretos

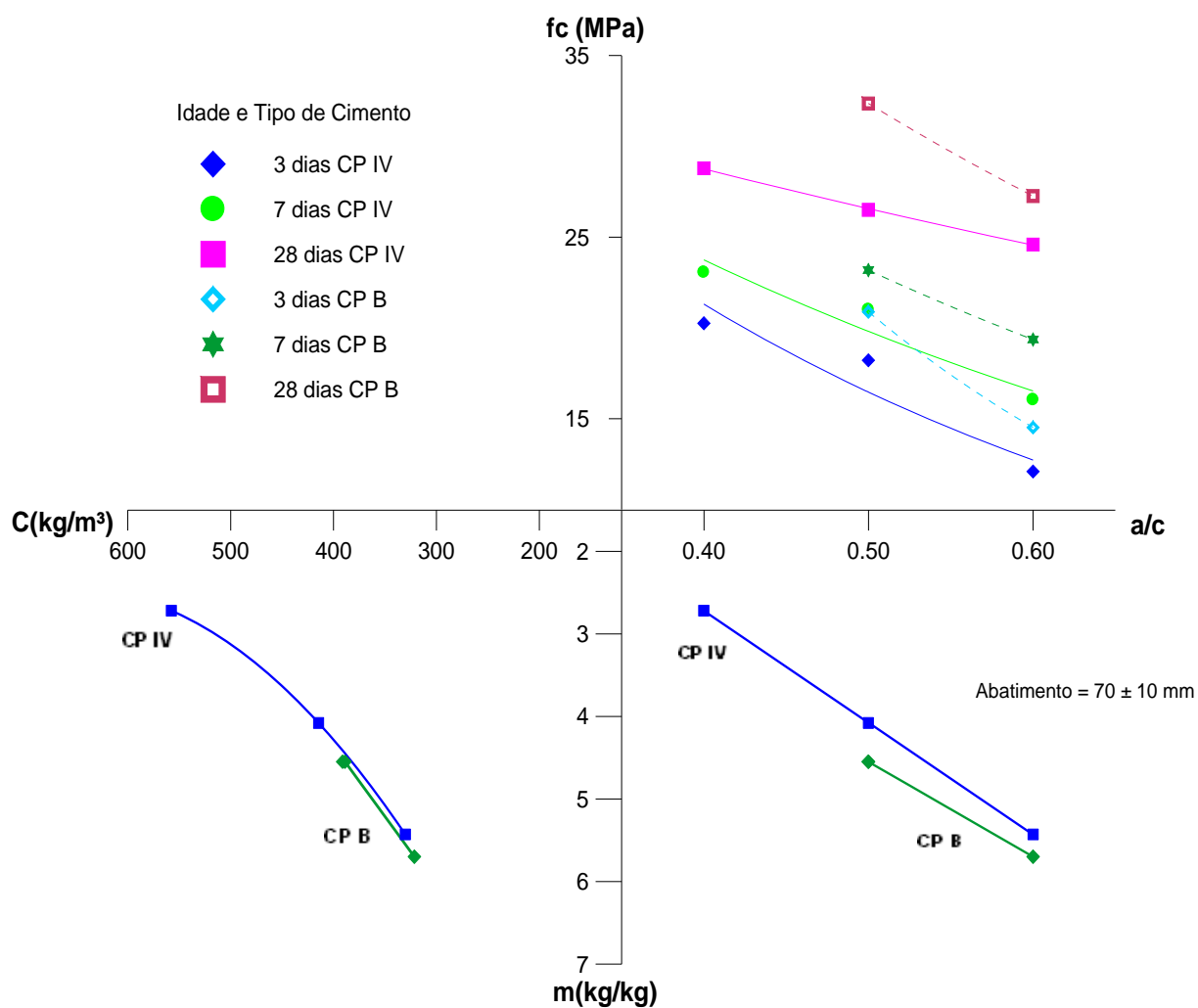


Figura 3 - Resistência à compressão média dos concretos conforme relação a/c

Observou-se na Figura 3 o que já é consenso em tecnologia do concreto, isto é, um aumento da resistência mecânica com a idade do concreto, que é devido à hidratação do cimento, e uma diminuição com o aumento da relação a/c.

Comparando-se os tipos de cimento utilizados, observou-se que os concretos produzidos com CP B apresentaram maiores valores de resistência à compressão que os concretos produzidos com CP IV para as idades e relações a/c comparadas, sendo até 22% superiores para a relação a/c 0,5 aos 28 dias. Tal comportamento do CP B já foi observado por Mattos e Dal Molin (2003), e as autoras creditam esse bom desempenho à presença de filler calcário na composição do cimento, o que contribui para a densificação da pasta de cimento hidratado através do refinamento dos poros, resultando no aumento da resistência mecânica.

O desenvolvimento da resistência das misturas aglomerantes compostas com pozolanas (CP IV)

decorre das reações de hidratação do clínquer e reações pozolânicas, ou seja, da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. A intensidade dessa reação depende das características físico-químicas mineralógicas das pozolanas (GASTALDINI *et al.*, 2002). Mas, de qualquer forma, a influência dessas adições só poderá ser realmente verificada com o decorrer do tempo, pois as pozolanas dependem tempo em suas reações, tendo um efeito mais pronunciado com a hidratação do cimento.

## Penetração de Cloretos

Com os resultados dos teores de cloretos obtidos na análise titulométrica, foram traçados os gráficos dos perfis de penetração, apresentados nas Figura 4, 5 e 6, de acordo com o tipo de cimento e a relação a/c do concreto, aos 2, 4 e 6 meses de imersão das vigas.

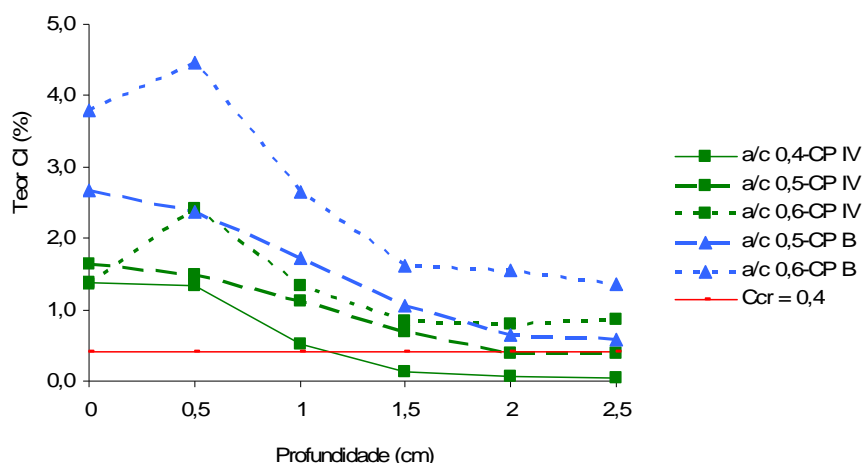


Figura 4 - Perfis de penetração de cloretos obtidos aos 2 meses de cada concreto

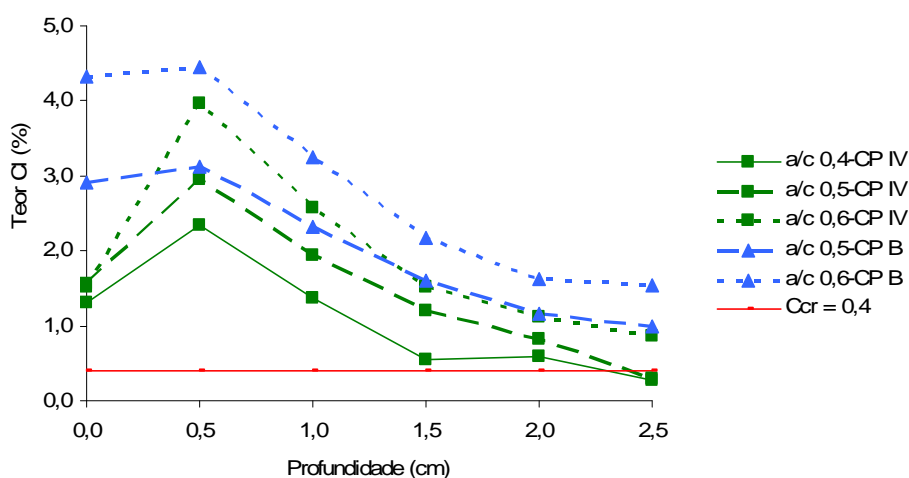


Figura 5 - Perfis de penetração de cloretos obtidos aos 4 meses de cada concreto



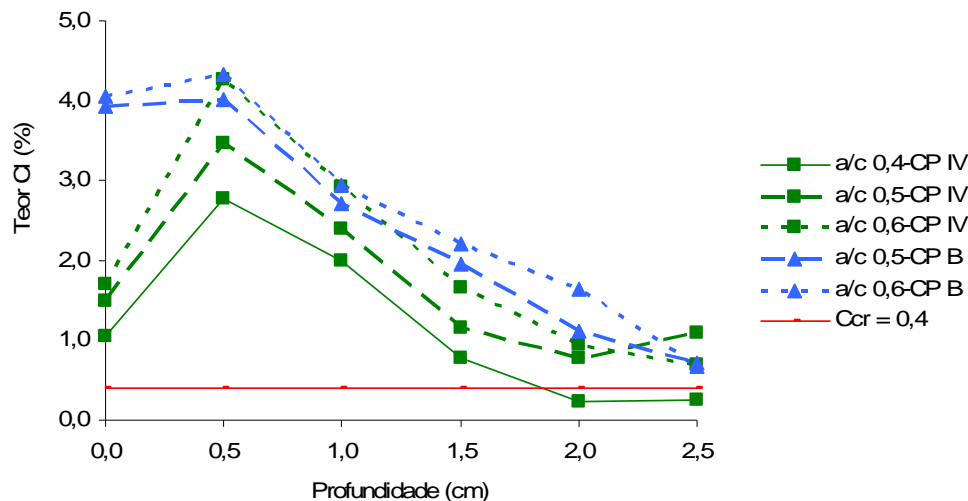


Figura 6 - Perfis de penetração de cloretos obtidos aos 6 meses de cada concreto

Observou-se o aumento da penetração de cloretos com a relação a/c dos concretos, como era de se esperar, haja vista a influência da relação a/c na porosidade do concreto.

A influência do tempo de exposição na penetração de cloretos nos concretos foi verificada numericamente, e observou-se o aumento da penetração de cloretos com o tempo de imersão das vigas em solução salina.

Observou-se que os concretos moldados com CP B apresentaram maiores perfis de penetração que os concretos de CP IV. De acordo com Page *et al.* (1986), o C<sub>3</sub>A e o C<sub>4</sub>AF, presentes na composição química dos cimentos, combinam-se com os cloretos livres formando cloroaluminatos, diminuindo o fluxo de penetração de cloretos na solução aquosa dos poros do concreto. Porém, o fíler calcário, presente em grande quantidade no cimento branco, reage com o C<sub>3</sub>A e com o C<sub>4</sub>AF formando monocarboaluminatos de cálcio, restando uma menor quantidade de C<sub>3</sub>A e de C<sub>4</sub>AF para fixar os cloretos livres, e já há uma redução de material cimentício no cimento pela substituição de clínquer pelo fíler calcário (KIRCHHEIM *et al.*, 2005).

No CP IV também há uma redução do material cimentício pela substituição do clínquer pelas pozolanas, mas, diferentemente do fíler, que exerce apenas um efeito físico, de tamponamento, as adições pozolânicas exercem um efeito químico, formando C-S-H secundário. De acordo com Dal Molin (1995), pozolanas ultrafinas (como sílica ativa e cinza de casca de arroz), além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição, o que contribui para o aumento da resistência mecânica do concreto.

As pozolanas despendem mais tempo em suas reações, tendo um efeito mais pronunciado em maiores idades. Já o fíler, presente no CP B, mostrou influência na resistência à compressão dos concretos logo nas primeiras idades. Concluiu-se com esse fato que a resistência mecânica não rege a resistência do concreto à penetração de cloretos, e sim a permeabilidade e a composição química do cimento, constituindo os fatores de maior influência nessa propriedade.

Na Figura 4 também está representado o teor crítico de cloretos ( $C_{cr}$ ), definido como 0,4%, de acordo com a literatura (HELENE, 1993). Observou-se que, para ambos os cimentos de relação a/c 0,5 e 0,6, aos 2 meses de imersão, o limite crítico já foi alcançado a uma profundidade de 2,5 cm da superfície.

Observou-se em todos os perfis de penetração de cloretos o efeito de pico, que se caracteriza pelo aumento da concentração de cloretos da superfície do concreto ( $x=0,0$  cm) para a primeira camada interna medida ( $x=0,5$  cm), sendo mais acentuado para os concretos de CP IV que para os concretos de CP B. Quando as vigas foram retiradas da solução de cloretos para a obtenção das amostras, houve a evaporação na camada mais superficial do elemento, enquanto nas camadas mais internas a concentração de cloretos se manteve com a umidade. De acordo com Andrade (2001), na área mais próxima à superfície do concreto, o mecanismo preponderante é a absorção, com posterior difusão de cloretos nas áreas mais internas, permanentemente úmidas.

Os valores de  $D$  e  $C_s$  determinados através do melhor ajuste utilizando-se a Equação 1 estão expressos nas Figura 7 e 8, respectivamente.

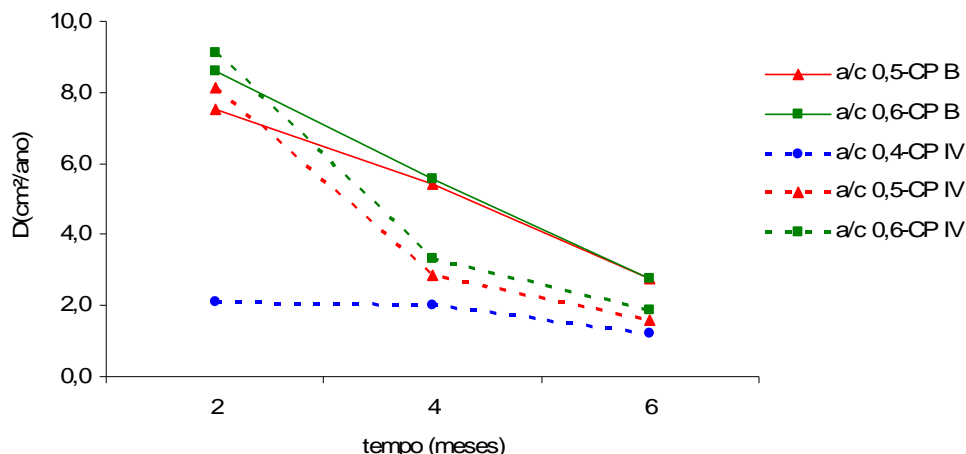


Figura 7 - Comportamento de  $D$  no período analisado

Observou-se na Figura 7 que os valores de  $D$  diminuíram com o passar do tempo, para ambos os cimentos. Essa diminuição ocorre principalmente em função dos processos contínuos de hidratação do cimento Portland, tal como demonstraram alguns autores (ANDRADE, 2001; LIN, 1990). Essa consideração deve ser levada em conta no momento de previsão de vida útil de estruturas, de forma a representar melhor as transformações que ocorrem no concreto.

Para a idade de 2 meses, observaram-se valores de  $D$  um pouco superiores para o CP IV em comparação aos do CP B para as relações a/c 0,5 e 0,6. Já aos 4 e aos 6 meses, o CP IV apresentou valores menores de  $D$  que o CP B, de acordo com a Figura 7. Esse melhor comportamento do CP IV somente a partir dos 4 meses demonstra que as pozolanas, presentes na composição desse cimento, dependem um tempo maior em suas reações, para apresentar um efeito sobre as propriedades do concreto, como citado anteriormente.

De acordo com Swamy *et al.* (1994), o efeito diferenciado de absorção de cloretos nas camadas adjacentes à superfície do concreto, isto é, a  $C_s$ , também influencia no valor de  $D$ . Os valores de  $C_s$  obtidos para cada idade analisada e relação a/c dos concretos de CP IV e CP B estão apresentados na Figura 8.

Observou-se na Figura 8 que  $C_s$  aumentou com o passar do tempo dentro do período analisado. Os valores de  $C_s$  foram maiores para as maiores relações a/c e para os concretos de CP B.

É difícil prever o comportamento que  $C_s$  terá nos concretos devido aos vários fatores que atuam sobre uma estrutura quando exposta. Andrade (2005) destaca que durante os primeiros anos de uma estrutura há um aumento de  $C_s$ , mas que após determinado período a camada superficial do concreto pode carbonatar ou estar sujeita aos ciclos

de molhagem e secagem, acarretando uma mudança no mecanismo de penetração de cloretos. Já Castro *et al.* (1999) comentam que a  $C_s$  é baixa para uma estrutura recém-construída, mas na medida em que a estrutura fica exposta à ação do ambiente, em área salina, os valores de concentração começam a aumentar.

De acordo com Lin (1990), existe uma dependência significativa entre  $D$  e  $C_s$  em concretos. Com o passar do tempo, a quantidade de cloretos sobre a superfície do concreto vai penetrando para as camadas adjacentes. Como visto na Figura 7 e na Figura 8, os concretos com maior  $C_s$  apresentaram também maiores valores de  $D$ .

Dessa forma, a variação da  $C_s$  de cloretos deve ser considerada na previsão da vida útil de estruturas de concreto, de forma que represente as transformações contínuas ocorridas em uma estrutura (intrínsecas ao concreto ou decorrentes do ambiente de exposição), para que se obtenham através da simulação resultados mais próximos aos obtidos experimentalmente.

## Previsão da Vida Útil de Projeto

Foi utilizada neste estudo a solução da função de erro da 2ª Lei de Fick para a modelagem da penetração de cloretos no concreto. Com a Equação 2 foram calculados os valores de vida útil de projeto dos concretos de relação a/c 0,5 dos dois tipos de cimento. A vida útil calculada representa o período de iniciação relacionado à corrosão de armaduras, fenômeno de maior incidência nas estruturas de concreto armado.

A solução utilizada não considera a variação dos parâmetros  $D$  e  $C_s$  com o passar do tempo, mas isso ocorre, tal como mostrado nos resultados da seção anterior. Na Tabela 5, estão apresentados os valores de vida útil de projeto.

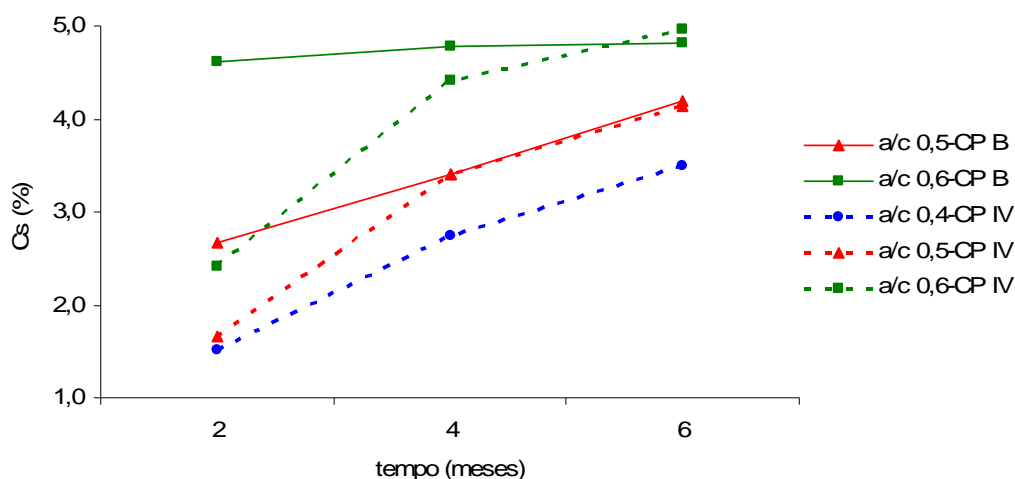


Figura 8 - Comportamento de Cs no período analisado

Tipo de cimento	$T_{\text{imersão}}$ (meses)	$D$ ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ )	$C_s$ (%)	Vida útil de projeto (anos)
CP B	2	7,52	2,68	0,8
	4	5,41	3,41	0,94
	6	2,74	4,19	1,64
CP IV	2	8,11	1,66	1,12
	4	2,85	3,41	1,79
	6	1,59	4,14	2,85

Tabela 5 - Previsão da vida útil de projeto

Observam-se na Tabela 5 que os valores menores de vida útil de projeto ocorreram nos concretos com maiores valores de  $D$ . Verifica-se também a variação da vida útil com a  $C_s$ , sendo diretamente proporcional. Para os dados referentes aos 6 meses de imersão, o CP B apresenta uma vida útil de 1,64 ano, 105% maior que o valor inicial (0,8 ano), referente aos 2 meses de imersão. O mesmo se observa para o CP IV, em que o aumento foi de 155%. Observa-se a grande influência da variação de  $D$  e  $C_s$  na vida útil de projeto dos concretos.

Conhecida a influência do tipo de cimento nas propriedades do concreto, verificou-se sua influência também sobre a vida útil. Para o concreto de CP IV, a vida útil de projeto prevista foi 73% superior que para o concreto de CP B utilizando os dados dos 6 meses de imersão.

Considerando a variação de  $D$  e  $C_s$  com o tempo, Andrade (2005) sugere o desenvolvimento de modelos que contemplem os seguintes aspectos para a determinação da vida útil:

- o período de absorção;
- a variação do coeficiente de difusão e da concentração superficial no tempo;
- a dependência do coeficiente de difusão com a concentração superficial; e
- a influência do tipo de cimento no coeficiente de difusão de cloretos.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5, observa-se a relevância das considerações feitas por Andrade (2005). Mas a solução da função de erro não considera a variação dos parâmetros  $D$  e  $C_s$  com o tempo, ou a influência do tipo de cimento na durabilidade do concreto. Logo, ao se empregar essa solução para a previsão de vida útil, não estão sendo consideradas as transformações que ocorrem na estrutura com o passar do tempo. Assim, estaria se admitindo que o concreto encontra-se completamente hidratado e não sofre mais qualquer influência da ação do ambiente ao qual está exposto para um tempo maior que  $t$ , o que não é possível de se prever e incorreto de se afirmar. Portanto, o tempo de vida útil

determinado através da solução da função de erro não representa o tempo de vida real que a estrutura pode vir a ter.

Por conseguinte, conclui-se que o uso da solução da função de erro da 2ª Lei de Fick deve se restringir à determinação dos parâmetros  $C_s$  e  $D$  em dado tempo  $t$ , não devendo ser empregada para a previsão de vida útil.

## Conclusões

Analisando os resultados de resistência à compressão apresentados pelos concretos em estudo, observaram-se maiores valores para o CP B em relação ao CP IV, para todas as relações a/c e idades comparadas. O fíler calcário, presente no CP B, exerce um efeito físico, de preenchimento dos poros e densificação da pasta. E, ainda, o CP B apresenta uma finura superior à do CP IV, característica que contribui para a hidratação do cimento e a resistência do concreto.

Os concretos de CP B apresentaram maiores perfis de penetração de cloretos que os concretos de CP IV, fato também observado em concretos com maior tempo de exposição e relação a/c. A presença de fíler também é responsável pelo maior teor de  $Cl^-$  no concreto de CP B, pela substituição do clínquer, reagindo com o  $C_3A$  e o  $C_4AF$ , que seriam os responsáveis pela fixação dos cloretos que ingressam no concreto através da formação de cloroaluminatos, o que diminuiria o fluxo de penetração.

Os concretos moldados com CP IV apresentaram valores maiores de  $D$  aos 2 meses que os concretos de CP B. Já aos 4 e aos 6 meses, o CP IV apresentou valores menores de  $D$  que o CP B. A partir disso, confirmou-se a variação de  $D$  com o passar do tempo, devido à hidratação do cimento e a influência das pozolanas no CP IV, que apresentam um efeito mais pronunciado com a hidratação do cimento. Os valores de  $C_s$  aumentaram com o passar do tempo no período analisado.

Verificou-se a influência do tipo de cimento e de  $D$  na previsão da vida útil de projeto dos concretos, obtendo-se valores distintos entre os tipos de cimento para cada período em que se realizou a análise (2, 4 e 6 meses de imersão). Com a diminuição de  $D$ , observou-se um aumento na vida útil.

Por fim, constatou-se que a solução da função de erro da 2ª Lei de Fick não deve ser utilizada para prever o tempo de vida útil de projeto de uma estrutura, já que esta não considera a influência das ações ambientais (trata  $C_s$  e  $D$  como constantes) e

dos fatores intrínsecos ao concreto que influenciam na durabilidade das estruturas.

## Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**. Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**. Agregado - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989**. Cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**: análises das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, J. J. O. Vida útil das estruturas do concreto. In: ISAIA, Geraldo (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994.

144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CALÇADA, L. M. L. **Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto**. 2004. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CASTRO, P. *et al.* Chloride Penetration Profiles in Marine Environments. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2., 1999. **Proceedings...** Gramado, 1999. p. 371-389.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. 1995. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; CERVO, T. C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes teores de pozolanas**. São Paulo, SP. 2002. 11 p. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 2., São José dos Campos, 2002.

HALAMICKOVA, P. *et al.* Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. **Cement and Concrete Research**, Nova York, v. 25, Issue 4, p. 790-802, May 1995.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; GALANTE, R. Concreto colorido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CIMENTO, 5., São Paulo. **Anais...** São Paulo: Congresso Brasileiro de Cimento (CBO), 1999. CD-ROM.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993. 349 p.

KIRCHHEIM, A. P. *et al.* Concreto branco. In: ISAIA, Geraldo (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

KROPP, J. Chlorides in concrete. In: KROPP, J.; HILSDORF, K. (Ed.). **Performance criteria for concrete durability**. RILEM Report 12, 1995. p. 138-64.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo de carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LIN, S. H. Chloride diffusion in a porous concrete slab. **Corrosion Science**, v. 46, n. 12, p. 964-967, 1990.

LORENSINI, R. V.; DINIZ, S. M. C. Avaliação probabilística da deterioração de estruturas em concreto armado causada pela ação de cloretos. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006. CD-ROM.

MATTOS, L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência do cimento Portland branco estrutural na resistência à penetração acelerada de íons cloretos e na absortividade de concretos com diferentes relações água/cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória, ES. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 580 p.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, Geraldo (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of diferente cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Research**, v. 16, p. 79-86, 1986.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimentos brancos**. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

RIZZON, A. C. **Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia: Energia, Ambiente e Materiais, ULBRA, 2006.

STEWART, M. G.; ROSOWSKY, D. V. Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks. **Structural Safety**, n. 20, p. 91-109, 1998.

SWAMY, R. N. *et al.* A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment. In: CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE. SWAMY, R. N. (Ed.). **Proceedings...** Sheffield Academic Press, 1994. p. 404-419.